

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

第2828369号

(45) 発行日 平成10年(1998)11月25日

(24) 登録日 平成10年(1998) 9月18日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 4 J 14/00

H 0 4 B 9/00

F

14/04

14/06

請求項の数22(全 13 頁)

(21) 出願番号 特願平4-109133

(22) 出願日 平成4年(1992)4月3日

(65) 公開番号 特開平5-136761

(43) 公開日 平成5年(1993)6月1日

審査請求日 平成5年(1993)4月5日

審判番号 平8-17453

審判請求日 平成8年(1996)10月21日

(31) 優先権主張番号 6 8 0 4 5 6

(32) 優先日 1991年4月4日

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(73) 特許権者 999999999

エイ・ティ・アンド・ティ・コーポレー
ション

アメリカ合衆国 10013-2412 ニュー

ヨーク ニューヨーク アヴェニュー

オブ ジ アメリカズ 32

(72) 発明者 ニール サルバトーレ ベルガーノ

アメリカ合衆国 07738 ニュージャージー

リー リンクロフト、ハーヴェイ アヴ

ェニュー 11

(74) 代理人 弁理士 岡部 正夫 (外1名)

合議体

審判長 田辺 寿二

審判官 谷川 洋

審判官 酒井 伸芳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光通信装置および方法

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】 ファイバ光伝送媒体上に少なくとも第1および第2の情報伝達信号を多重化する装置において、前記伝送媒体上に第1の周波数でソリトン・パルス流を発生する手段(201)、

前記のソリトン・パルス流を本質的に直交する偏光を有する少なくとも第1および第2のパルス流に分離する手段(202)、

第1および第2の変調された信号を生成するために、前記の第1および第2のパルス流を前記の第1および第2の情報伝達信号でそれぞれ変調する手段(205、206)、

前記の第1および第2の変調された信号を時間的に相互挿入する手段(209、210)、および前記の時間的に相互挿入された信号を前記伝送媒体に加える手段を備

2

えたことを特徴とする光通信装置。

【請求項2】 前記の相互挿入された信号を第1および第2の本質的に直交する偏光を有するパルスからなる復元されたパルス流へと分離し復元する手段(401~410)を受信側にさらに備えたことを特徴とする請求項1記載の装置。

【請求項3】 送信側において本質的に直交する偏光を有する第1および第2の情報伝達ソリトン・パルス流を光伝送媒体上に時間的に相互挿入する手段(201~214)、および受信側において前記の第1および第2の情報伝達ソリトン・パルス流に分離し復元する手段(401~410)を備えたことを特徴とする光通信装置。

【請求項4】 第1のソリトン・パルス流を第1の情報伝達信号によって変調する手段(205)、第2のソリトン・パルス流を第2の情報伝達信号によ

て変調する手段 (206)、

本質的に直交する偏光を有する前記の変調された第1および第2のパルス流を時間的に相互挿入する手段 (209、210)、および前記の相互挿入されたパルス流を光伝送媒体に印加する手段を備えたことを特徴とする光通信装置。

【請求項5】 第1の周波数のソリトン・パルス源 (201)、

前記ソリトン・パルスの第1の流れを第1の情報伝達信号で変調し、当該変調出力が第1の偏光を有する手段 (202、205)、前記ソリトン・パルスの第2の流れを第2の情報伝達信号で変調し、当該変調出力が前記第1の偏光とほぼ直交する第2の偏光を有する手段 (202、206)、および多重化された信号を前記第1の周波数の2倍の周波数で生成するために、変調されたソリトン・パルスの前記第1および第2の流れを時間的に相互挿入する相互挿入手段 (209、210)を備えたことを特徴とする光通信システムのための光送信装置。

【請求項6】 前記相互挿入手段が、変調されたソリトン・パルスの前記第2の流れを遅らせるように適合された調節可能な遅延線 (209)を備えたことを特徴とする請求項5記載の装置。

【請求項7】 ソリトン・パルス流を異なる偏光を有する複数の別個のパルス流に分割する手段 (202)、前記ソリトン・パルス流の各々を異なる情報伝達信号で変調する手段 (205、206)、および多重化されたソリトン・パルス流を生成するために、前記の変調されたパルス流の各々を時間的に相互挿入する手段 (209、210)を備えたことを特徴とする光通信装置。

【請求項8】 直交する偏光を有する第1および第2のソリトン・パルス流を発生する発生手段 (201、202)、

前記の第1および第2のソリトン・パルス流を第1および第2のデータで変調する変調手段 (205、206)、および多重化された信号を形成するために前記の第1および第2の変調されたパルス流を時間的に相互挿入する相互挿入手段 (209、210)を備えたことを特徴とする光通信装置。

【請求項9】 前記発生手段が、ソリトン・パルス源 (201)、および偏光化パルス・スプリッタ (202)を備えたことを特徴とする請求項8記載の装置。

【請求項10】 前記変調手段が、パルス振幅変調器 (205、206)を備えたことを特徴とする請求項9記載の装置。

【請求項11】 前記相互挿入手段が、調節可能な遅延線 (209)を備えたことを特徴とする請求項10記載の装置。

【請求項12】 ファイバ光伝送媒体上に少なくとも第1および第2の情報伝達信号を多重化するために、

前記伝送媒体上に第1の周波数でソリトン・パルス流を発生するステップ (201)、

前記のソリトン・パルス流を本質的に直交する偏光を有する少なくとも第1および第2のパルス流に分離するステップ (202)、

第1および第2の変調された信号を生成するために、前記の第1および第2のパルス流を前記の第1および第2の情報伝達信号でそれぞれ変調するステップ (205、206)、

10 前記の第1および第2の変調された信号を時間的に相互挿入するステップ (209、210)、および前記の相互挿入された信号を前記伝送媒体に加えるステップを備えたことを特徴とする光通信方法。

【請求項13】 前記の相互挿入された信号を第1および第2の本質的に直交する偏光を有するパルスからなる復元されたパルス流へと分離するステップ (401～410)を受信側にさらに備えたことを特徴とする請求項12記載の方法。

20 【請求項14】 本質的に直交する偏光を有する第1および第2の情報伝達ソリトン・パルス流を光伝送媒体上に時間的に相互挿入するステップ (201～214)、および前記の第1および第2の情報伝達ソリトン・パルス流に分離し復元するステップ (401～410)を備えたことを特徴とする光通信方法。

30 【請求項15】 第1のソリトン・パルス流を第1の情報伝達信号によって変調するステップ (205)、第2のソリトン・パルス流を第2の情報伝達信号によって変調するステップ (206)、本質的に直交する偏光を有する前記の変調された第1および第2のパルス流を時間的に相互挿入するステップ (209、210)、および前記の相互挿入されたパルス流を光伝送媒体に印加するステップを備えたことを特徴とする光通信方法。

40 【請求項16】 第1および第2のソリトン・パルス流を形成するステップ (201、202)、前記第1のソリトン・パルス流を第1の情報伝達信号で変調し、当該変調出力が第1の偏光を有するステップ (205)、前記第2のソリトン・パルス流を第2の情報伝達信号で変調し、当該変調出力が前記第1の偏光とほぼ直交する第2の偏光を有するステップ (206)、および多重化された信号を生成するために、変調されたソリトン・パルスの前記第1および第2の流れを時間的に相互挿入する相互挿入ステップ (209、210)を備えたことを特徴とする光通信システムのための光送信方法。

【請求項17】 前記相互挿入ステップが、変調されたソリトン・パルスの前記第2の流れを調節可能な遅延を用いて遅らせること (209)を含むことを特徴とする請求項16記載の方法。

50 【請求項18】 ソリトン・パルス流を異なる偏光を有

する複数の別個のパルス流に分割するステップ (2 0 1、2 0 2)、

前記ソリトン・パルス流の各々を異なる情報伝達信号で変調するステップ (2 0 5、2 0 6)、および多重化されたソリトン・パルス流を生成するために、前記の変調されたパルス流の各々を時間的に相互挿入するステップ (2 0 9、2 1 0) を備えたことを特徴とする光通信方法。

【請求項 1 9】 直交する偏光を有する第 1 および第 2 のソリトン・パルス流を発生する発生ステップ (2 0 1、2 0 2)、

前記の第 1 および第 2 のソリトン・パルス流を第 1 および第 2 のデータで変調する変調ステップ (2 0 5、2 0 6)、および多重化された信号を形成するために前記の第 1 および第 2 の変調されたパルス流を時間的に相互挿入する相互挿入ステップ (2 0 9、2 1 0) を備えたことを特徴とする光通信方法。

【請求項 2 0】 前記発生ステップが、ソリトン・パルスの信号源 (2 0 1) の出力を分離すること (2 0 2) を含むことを特徴とする請求項 1 9 記載の方法。

【請求項 2 1】 前記変調ステップが、パルス振幅変調を含むこと (2 0 5、2 0 6) を特徴とする請求項 1 9 記載の方法。

【請求項 2 2】 前記相互挿入ステップが、前記パルス流の 1 つに導入された遅延を調節すること (2 0 9) を含むことを特徴とする請求項 2 1 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【産業上の利用分野】 本発明は、概して光通信に関し、特にソリトンを用いる多重通信に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】 最近、多くの出版物において、光ファイバ通信装置においてソリトン（即ち、さらに正確には単一モード光ファイバにおいて存在し得る電磁放射の波形維持パルス）を使用することの利点が議論されてきた。この典型例は、1 9 8 3 年 9 月 2 7 日付けで A. ハセガワ (Hasegawa) に発行された米国特許第 4, 406, 516 号、1 9 8 1 年の IEEE 会報第 6 9 (9) 巻 p. 1145-p. 1150 の A. ハセガワ他による論文、および 1 9 8 9 年 9 月の「物理の世界 (Physics World)」の p. 29 以降に現れた応募者による論文であるが、それらはすべて参照によりここに取り入れてある。

【0 0 0 3】 周知のことであるが、パルスがソリトンの状態を維持するためには、パルスのすべての部分が、ファイバによる複屈折に起因する偏光状態の絶え間ない変化にもかかわらず、共通の偏光状態を維持することが要求される。しかし、共通の偏光と共通の履歴を有する一連のソリトンを送った場合、ソリトンが伝送システムを進むときにパルス毎に共通の偏光状態で現れることは知られていなかった。パルスの履歴は次のものによって変

更されうる。即ち、(1) システムを構成するファイバの部分の複屈折の変化、および (2) 個々のパルスに無作為に加えられる自然放出雑音 (A S E) である。前者の変化は、非常にゆっくりした（一般に数分またはそれ以上の）時間的規模で起こるので、システムの出力における自動偏光制御装置によって容易に補償することができる。このように、ソリトン流の偏光状態をパルス毎に変化させる可能性を持つのは A S E の影響だけである。

【0 0 0 4】

10 【発明が解決しようとする課題】 従って、発明が解決しようとする課題は、ソリトン流の偏光状態を制御して多重化することである。

【0 0 0 5】

【課題を解決するための手段】 本発明を実施するために、ランダムな複屈折を有するシステムを通る伝送の数値シミュレーションにより A S E 雑音の影響を予測し、その影響を分析的かつ実験的に研究した。シミュレーションにより、 $(\Delta \beta / h^{1/2} \leq 0.2 \text{ ps/km}^{1/2})$ を有する散乱シフト光ファイバおよび 20 30 km 間隔で配置した増幅器からなる長さ 9000 km のシステムを進むソリトンの偏光が著しく良好に保存されることが分かった。

【0 0 0 6】 本発明によれば、送信側において 2 つの別様に偏光されたパルスを時分割多重化し（即ち、相互に挿入し）、さらに両方のデータ流を復元するために受信側で 2 つのパルス流を分離することによって、ソリトン・システムの容量は本質的に 2 倍になる。

【0 0 0 7】

30 【実施例】 本発明は、ソリトン通信システムにおいて偏光分割および時間分割の多重化を利用するものであるが、ソリトンが一般にビット周期の僅かな部分（20 % 以下）を占めるに過ぎないので、独立した信号源からの情報を運ぶいくつかのパルス列を時間的に相互挿入し且つ異なる偏光と多重化することができるという事実に基づいている。受信側では、受信した信号に対し偏光の分離を行うが、この点は実験的かつ理論的に確認済みである。以下において、これを詳細に説明する。

40 【0 0 0 8】 本発明の説明を続ける前に明らかにする必要があるのは、ソリトンについて可能な偏光の分離が他のパルスについては不可能なことである。特に、色分散がゼロの波長 (λ_0) で送信される非ゼロ復帰 (NRZ) フォーマットにおける多少なりとも方形のパルスの伝送に関しては不可能である。1 9 8 9 年 5 月の「オプティクス・レターズ (Opt. Lett.)」第 1 4 巻 p. 523-p. 525 の C. D. プーレ (Poole) による論文「ランダム・モード結合による単一モード・ファイバにおける偏光モードの分散の測定 (Measurement of Polarization-Mode Dispersion in Single-Mode Fibers With Random Mode Coupling)」において、伝送システムは、強さと方向 50 が不揃いの波平面が多数積み重なったようなものである

が、「早い」主偏光状態と「遅い」主偏光状態との間の全体的な時間遅れの差 δT (λ) によって特徴づけることができることが示された。 δT は、 Z をシステムの全長とした場合、ゼロ平均が $\langle \delta T \rangle = 0$ および標準偏差が $(\langle \delta T^2 \rangle)^{1/2} = \Delta \beta / h^{1/2} Z^{1/2}$ である確率分布を有する。例えば、 $\Delta \beta / h^{1/2} = 0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ かつ $Z = 10,000 \text{ km}$ のシステムに対しては、 $(\langle \delta T^2 \rangle)^{1/2} = 20 \text{ ps}$ となる。

【0009】また、前記のプーレによる論文によって、変化する光周波数に関して $\delta f = (2(\langle \delta T^2 \rangle)^{1/2})^{-1}$ によって与えられる平均周期 δf を偏光が有することが明らかになった。従って、 $(\langle \delta T^2 \rangle)^{1/2} = 20 \text{ ps}$ の場合、 $\delta f = 25 \text{ GHz}$ となり、システムの出力における一出力の偏光状態 (SOP) の強度変化は、周波数の関数として図 1 に示したように振る舞う傾向がある。長さ $10,000 \text{ km}$ までの NRZ システムにおいては、ファイバの非線形効果が分散によって中和されない (ソリトンに対しては、そうである) という事実のために、パルスが実質的に大きな非線形位相転移 $\phi_{nl} > \pi$ を受けるので、毎秒何ギガビットという速度で伝送するシステムに於いて、パルス列の周波数スペクトラムは、一般に何 THz にもわたって広がってしまう。これについては、1991 年 3 月の「光波技術ジャーナル (Journal of Lightwave Technology)」第 9 巻第 3 号 p. 356 の D. マーカス (Marcuse) による論文「ゼロ分散に光増幅器を有する非常に長い非線形ファイバにおける単一チャネル動作 (Single-Channel Operation in Very Long Nonlinear Fibers with Optical Amplifiers at Zero Dispersion)」に説明がある。図 1 に示した周波数に関する偏光の急激な変化を考えれば、パルスの種々の周波数成分が、多様に偏光されるので、パルスは偏光でなくなることになる。従って、NRZ に対しては、最初に互いに直交に偏光されたパルス列を分離する必要があるが、分離の可能性がないが、ソリトンならば可能である。

【0010】本発明の原理を理解できるようにし、かつ説明を簡単にするために、それぞれ 2.5 GHz の 2 つのチャネルから単一の 5 GHz のチャネルへの多重化、および受信端におけるそれに対応するデマルチプレクシング (多重化の解除) を図 2 のマルチプレクサに関連付けて最初に説明する。

【0011】2 つのチャネルに対する単一光源は、 2.5 GHz の速度で 3.5 乃至 50 ps 幅のソリトン・パルス生成する単一のモード固定レーザ (M. L. L.) 201 である。レーザの出力は、スプリッタ 202 において本質的に直交する偏光を有する 2 つのソリトン・パルス流に分離され、それぞれ半分が変調器 (MOD.) 205 および 206 において (DATA1 および DATA2 と記した異なる情報を伝える信号によって) 別個に変調される。スプリッタ 202 は通常のスプリッタと通

常の偏光移相器の縦接続で実現される。すなわち通常のスプリッタが 1 つの入力ソリトン・パルス流を 2 つの出力ソリトン・パルス流に分割し、その後 2 つの出力ソリトン・パルス流の一方の偏光を偏光移相器で調節して、他方の出力ソリトン・パルス流の偏光と直交するようにする。光学スプリッタは線形装置であって、スプリッタに印加された入力信号の 2 つの正確なレプリカを出力する。スプリッタの出力で適当なソリトンパワーを保つために、レーザ 201 の出力でのパワーは適当に調節される。また、スプリッタ 202 で単にソリトン・パルス流を分割し、変調器 205 と 206 で変調後に偏光コントローラ 213 と 214 によってそれぞれのソリトン・パルス流の偏光を直交させても良い。変調器 205 が、第 1 の情報伝達信号 (導線 207 のデータ流) を受信する一方で、変調器 206 が、導線 208 の第 2 のデータ流を受信する。その後 2 つのソリトン・パルス流は、スプリッタ 210 において再結合するが、その前に、その 2 つのパルス流が時間的に互いに差し込まれるようにパルス流の一方を調節可能な遅延線 209 において 2.5 Gbit/s のビット周期の半分だけ遅らせる。

【0012】ここで、図 2 の装置に関する詳細を少し整理する。変調器 205 および 206 は、好ましくは、ソリトン・パルスのチャープングを実質的には一切生成せず且つ適切なオン/オフ比 (20 dB) を有するように LiNbO_3 の平衡マッハ・ツェンダー型とするべきである。変調器 205 および 206 への入力において必要とされる線形偏光およびそれ自体の偏光多重化に必要な線形偏光は、マルチプレクサ全体に (線形) 偏波維持ファイバを使用するか、または図 2 の示したように変調器 206 および 206 の前後のコントローラ 211 ~ 214 のような偏光コントローラを使用することによって維持することができる。偏光コントローラ 211 ~ 214 は、1980 年「エレクトロニクス・レターズ (Electronics Letters)」第 16 巻 p. 778 の H. C. ラベブレ

(Levevre) による論文「単一モード・ファイバの小信号装置および偏光コントローラ (Single-Mode Fiber Fractional Wave Devices and Polarization Controllers)」において説明されているように配置することができる。2 つのソリトン・パルスを時間的に相互挿入するために、マルチプレクサの 2 つの腕の相対的長さを正確に調節する必要がある。これは、変調器 206 の出力と偏光スプリッタ 210 との間に配置して示した調節可能な遅延線 209 によって行うことができる。しかし、遅延線 209 は絶対必要と言うわけではない。何れか一方の腕の長さを 1 乃至 2 回の試験によって正しい長さの数ピコ秒以内に調節して、装置が全体として全部導波路のままであるようにすることも可能である。

【0013】図 2 の正しく調節されたマルチプレクサから出力された元のソリトン・パルス流は、図 3 に示すように現れる。x および y 軸にそったフィールドの包絡線

は、異なる（直交する）偏光のパルスを表す。例えば、ソリトン・パルス 3 0 1 および 3 0 2 は、その軸方向の初期の偏光と 4 0 0 p s の周期とを有する。ソリトン・パルス 3 0 3 および 3 0 4 は、直角の（y 方向の）偏光と 4 0 0 p s の周期とを有し、第 1 のパルス列と時間的に相互挿入されている。パルス流における時間軸上で予測される位置、即ち名目上の位置にパルスが有るか無いかによって情報が伝えられる。注目すべきことは、図 3 のようにソリトン・パルスを発射することにより、受信端における時間分割と偏光分割を組み合わせたデマルチプレクシングに対する可能性が生まれるだけでなく、位相間変調の可能性が実質的に除去され、従って、伝送中の 2 つのチャンネル間の相互作用の可能性も実質的に除去される。

【0 0 1 4】2 つの偏光成分を等しく重み付けして出力パルス流の標本を取り、検出された標本の光学スペクトラムまたはマイクロ波スペクトラムの何れかが観察できるようにすることによって、マルチプレクサが正しく調節されていることを確認することができる。一般に、不規則に変調されたパルス流は、2 . 5 G H z の倍数によって分離された成分を有する線スペクトラムを示す。相対的な腕の長さを正しく調節するために（ソリトン・パルスの完全な時間的相互挿入のために）、2 . 5 G H z の奇数の高調波はなくなり、5 G H z の倍数によって区切られた成分のみが残される。従って、時間的な調節について検査を行う最も単純な装置は、おそらく検出器および 2 . 5 G H z に同調した簡単な共振回路から構成されるであろう。

【0 0 1 5】偏光分割多重化／デマルチプレクシングが成功するために、伝送線路は、それ自体が 2 つの必要条件を満たす必要がある。第 1 に、任意の 2 つの直交する偏光に対するシステム利得の全体的な差は、数 d B 以下でなければならない。第 2 に、任意の 2 つの直交する偏光に対するシステムの δT が、ビット周期に比較して小さくなければならない。第 1 の必要条件は、完全非偏光性の波長分割多重化（WDM）カブラをポンプ注入（例えば J D S 光学によって行われる注入法で、干渉フィルタからの本質的に垂直な入射角の反射を用いる）に用い、かつ他のすべての潜在的に偏光性の部品を最小に保つことによって、満たすことができる。このような偏光に依存しない利得は、分散シフトした増幅ファイバ、J D S カブラ、入出力のための非偏光性のファイバ融着カブラ、および 1 つのほぼ非偏光性のアイソレータ以外は何も含まない再循環ループにおいて実現された。第 2 の必要条件は、現在入手可能な分散シフト・ファイバによって容易に満たすことができる。ただし、そのためには、最大システム長（10,000km）に対しても（ $< \delta T_2 >_{1/2} = 20 \text{ p s}$ またはそれ以下となるように、偏光分散パラメータ $\Delta \beta / h^{1/2}$ は、一般に $0.2 \text{ p s / n m / k m}$ 以下である。

【0 0 1 6】偏光され相互挿入されたソリトン・パルスを受信端においてデマルチプレクスするために、デマルチプレクサの各腕における不要なチャンネルを線形偏光アナライザによって最適に除くことができるように、出現する任意の偏光状態を変換しなければならない。この変換は、1991 年 2 月の「エレクトロニクス・レターズ」第 27 巻第 4 号 p. 377-p. 379 に説明されているように F. ヘイスマン (Heismann) 他により最近作成され検査された種類の電気駆動で連続的に調節可能な偏光コントローラによって行っても良い。直交する偏光に対する全体的な利得がほぼ等しい場合、2 つのチャンネルに対する偏光は、全体的に直角のままである。その場合、必要なコントローラは 1 つであり、それによって、それらのデータ流を 2 つの直交する線形偏光へと変換することができる。そこで、デマルチプレクサは、図 4 のように構成することができる。

【0 0 1 7】図 4 に示したように、入力 4 0 1 において受信される多重化信号は、不定の偏光を有する 5 G H z のパルス流である。この入力、ヘイスマンの偏光コントローラ 4 0 2 に加えられる。このコントローラにより、不規則に変化する入力の偏光状態を所望の特定の出力偏光状態に変換することができる。この変換は、到来する 5 Gbit/s のデータ流の偏光状態を偏光スプリッタ 4 0 4 のみを用いて出力 4 0 5 および 4 0 6 の 2 つの 2 . 5 Gbit/s のパルス流に変換するのに使用することができる。出力 4 0 5 のパルス流は、情報伝達信号の一つ、即ちデータ 1 によって変調され、出力 4 0 6 のパルス流は、他方の情報伝達信号、即ちデータ 2 によって変調される。出力 4 0 6 の信号の一部は、検出器 4 0 8 および誤差信号電子回路 4 1 0 によってコントローラ 4 0 2 に帰還される。電子回路 4 1 0 は、コントローラ 4 0 2 が到来する 5 Gbit/s のパルス流の偏光状態の緩やかな変化を追跡・補正するのに必要な誤差信号を発生する 2 . 5 G H z のマイクロ波共振フィルタを備えている。

【0 0 1 8】さらに一般的な場合、直交する偏光に対し利得に小さいがかなりの差があれば、デマルチプレクサに印加されるパルス流に含まれるような 2 つのチャンネルに現れる偏光は、もはや完全には直角ではない。この場合、図 5 に示したように、非偏光性の 3 d B スプリッタ 5 0 1 を用いて入力パルス流を分離し、その一部を 2 つの同様なヘイスマンの偏光コントローラ 5 0 2 および 5 0 3 の各々に（一般に等しく）印加するようにする。各コントローラの出力をそれぞれの線形アナライザ 5 0 4 および 5 0 5 に加える。アナライザは、その偏光を線形かつコントローラ 5 0 2 または 5 0 3 に対し直角となるようにすることによって各腕における不要なチャンネルを除去する。このようにして、データ 1 は出力 5 0 6 に復元され、データ 2 は出力 5 0 7 に復元される。

【0 0 1 9】各偏光コントローラ 5 0 2、5 0 3 に対し

誤差信号を生成するために、図4に関連して既に説明した方法を用いてもよい。従って、デマルチプレクサの各出力506、507からの2.5 Gbit/sのデータ流の標本をそれぞれの検出器508、509に加え、さらに対応する2.5 GHzのマイクロ波共振フィルタ510、511に通す。偏光コントローラ502および503は、共に最大の信号に対して調節されている。(図4の場合のような完全に直交するチャンネルに対しては、これは一方の腕に対して行うだけで良い。)前記の参考文献においてヘイスマンによって実証されて周知のように最大値に固定された状態に保つために、偏光コントローラの1つの要素を変動させ、適切な誤差信号を取り出すように位相感応的検出を用いる必要がある場合も時としてある。

【0020】2.5 GHzの最大の信号が必要な理由を知るために、偏光コントローラの可能な最悪の調節の場合、デマルチプレクサの各腕における各データ流からはほぼ等しい信号を出力しがちであるが、2.5 GHzの奇数倍がマイクロ波スペクトラムから消える傾向がある点に注目する必要がある。

【0021】我々が行ったシミュレーションにより、所与のチャンネルからのパルスに対するフィールドのベクトルは、平均を線形偏光に変換した場合、その平均から約 $\pm 3.3^\circ$ 以上逸れることは滅多にないことが分かる。さらに正確に言えば、角度偏差は、平均(0°)を中心とするガウス分布であり、標準偏差 σ は、約 3° である。従って、角度偏差が 7σ 以下のパルスの場合(7σ 以上の偏差のパルスの確率は約 10^{-10} に過ぎない)、線形アナライザにより、 $(\sin 21^\circ)^2$ を除くすべて、即ちデータ1の信号を伝えるチャンネルからデータ2の信号を伝えるチャンネルのパルスのうち最も逸れるものおよびその逆のものの強度の約15%を除去することができる。このような漏れは、自然放出(ASE)雑音の大きな変移に比較して小さいので、ビット誤り率に影響を及ぼす見込みはない。また、この漏れは、送信側における変調器のエネルギーの「ゼロ」への漏れに匹敵することに注意を要する。しかし、必要ならば、図6に示したように、各チャンネルにおいて検出のための時間的枠を幾分狭くすることによって、誤りの可能性をさらに低減することができる。このように、非対称な時分割多重も可能であるから、通常の2.5 Gbit/sのビット周期の境界付近の狭い時間帯に到達するパルスを禁止することができる、換言すれば、所望の時間枠に入るパルスのみを検出して、以降の処理をすることができるようになる。ここで述べた禁止は、別の電子光学的変調器または電子的に順方向の検出によって実現することができる。例えば、図6の「禁止」帯601および602が、境界の両側に約 $\pm 3\sigma$ まで及ぶ場合、不要なパルスがその禁止帯にある確率は 10^{-3} 未満である。ただし、 σ は1986年10月の「オプティクス・レターズ (Opt. Lett.)」

第11巻p.665-p.667の「光ファイバ伝送におけるコヒーレントに増幅されたソリトンのランダム・ウォーク (Random Walk of Coherently Amplified Solitons in Optical Fiber Transmission)」においてJ. P. ゴードン (Gordon) およびH. A. ハウス (Haus) によって説明されたタイミング・ジッタの標準偏差である。増幅器の間隔および雑音指数について適切な仮定が与えられた場合、 σ の典型的な値は、9000 kmで約13 psであるから、通常の400 psのビット周期から全体で約80 psが排除されることになる。これに対して、 10^{-12} の誤り率に対して、ゴードン-ハウスのジッタは、この場合、約 $2 \times 7 \times \sigma$ 、即ち約180乃至200 psの総パルス幅を必要とする。従って、320 psの捕捉帯604、605であれば、実質5 Gbit/sの単一波長速度に対し大きな安全余裕を与えることができる。実際には、7.5 Gbit/s (2つの3.75 Gbit/sのチャンネルを一緒に多重化したもの。これにより、適当な大きさ $267-80=187$ psの有効捕捉帯が得られる。)に近い単一波長速度を得ることができる。従って、前記のように、ここに説明した方法により、超長距離ソリトン伝送システムの単一波長容量を2倍または少なくとも2倍程度にすることができる。

【0022】前記のシミュレーションに加え、50 psのソリトンが9000 kmを含む同距離までのいろいろな距離を通った後のソリトン列の偏光角の直接的実験的測定を行った。つまり、現れる偏光を正確に線形な偏光に変換することによって、消滅比(現れる偏光に対して平行および垂直に向けた線形アナライザを通して伝送される光の強度の比)を測定し、9000 kmで24 dBという値になり、さらに距離が短くなるとそれに応じて比が大きくなることが分かった。また、この実験による測定結果は、このようにして測定された消滅比は所与の距離における信号対雑音比によって与えられるという解析的理論とほぼ一致する。このように、ソリトンが実際に適切に偏光された状態を保つという3つの論拠、即ち数値シミュレーション、実験による測定、および解析的理論が得られる。本発明の効力を確認するすべての3つの技法が緊密に符合することを図7に示す。同図において、約9000 kmの経路長に対する消滅比が約24 dBであること、および所望の偏光方向のエネルギーの $1/250$ 以下が他の偏光方向に失われることを知ることができる。

【0023】以上の説明は、本発明の一実施例に関するもので、この技術分野の当業者であれば、本発明の種々の変形例が考えられるが、それらはいずれも本発明の技術的範囲に包含される。従って、例えば、2つの信号の多重化を示して説明したが、別な信号が適切に別のモードで偏光されているならば、その次代の信号も同様にして結合することができる。

【0024】

【発明の効果】また、次の点に留意を要する。ソリトンシステムは、それが何であれ、その単一波長容量をWDM（波長分割多重化）の使用によって少なくとも数倍に増やすことができる。WDMについては、1991年3月の「光波技術ジャーナル（Jrnl Lightwave Tech）」第9巻第3号p.362-p.367のL. F. マレノー（Mollenauer）、S. G. エバンジジェリデ、およびJ. P. ゴードンによる「集中増幅器を用いる超長距離伝送におけるソリトンによるWDM（WDM With Solitons in Ultra Long Distance Transmission Using Lumped Amplifiers）」と題する論文に説明がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】長い不規則な複屈折光ファイバの出力において光の周波数で特定の偏光状態（SOP）を有する初期偏光された非ソリトン・パルスの強度の典型例を示す図である（ δf の一般的な値は、偏光散乱パラメータ $0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ を有する長さ $10,000 \text{ km}$ のシステムに対して 25 GHz である）。

【図2】本発明によって構成されたマルチプレクサの略図である。

【図3】図2のマルチプレクサの出力におけるソリトン・パルス・フィールドの包絡線を示す図である。

【図4】到来する信号が互いに直角に偏光されている場合に使用されるべきデマルチプレクサの略図である。

【図5】偏光に関するシステム利得の変動のために到来する信号が完全に直交するように偏光されていないときに使用されるべきデマルチプレクサの略図である。

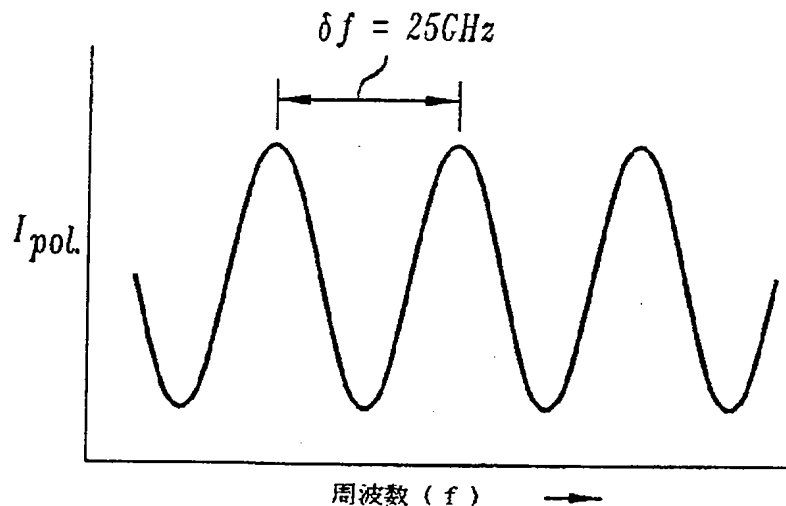
【図6】偏光分割多重化と組み合わせて使用される非対称な時分割多重化に対する禁止帯および捕捉帯を示す図である。

【図7】コンピュータ・シミュレーション、分析モデル、および本発明の効力を確認する実験結果の一致を示すグラフである。

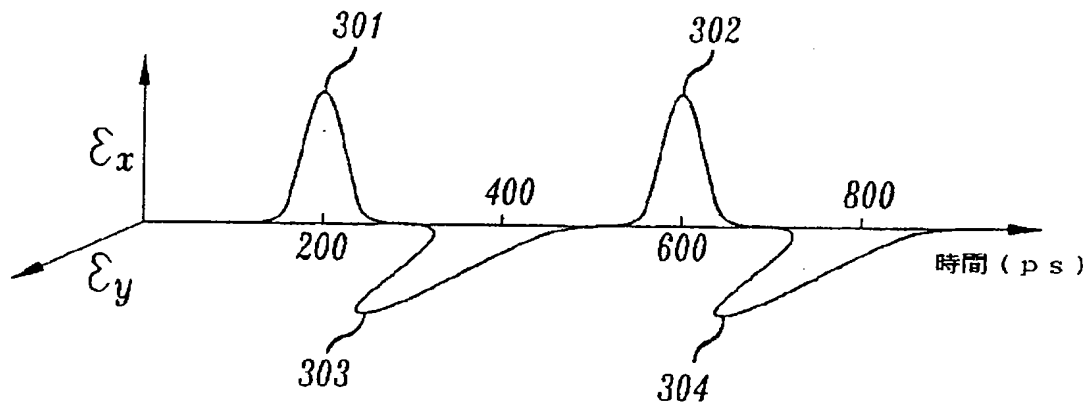
【符号の説明】

- 201 モード固定レーザ（M. L. L.）
- 202 スプリッタ
- 211、212、213、214 偏光コントローラ
- 205、206 変調器
- 209 調節可能な遅延線
- 210 偏光スプリッタ
- 404、502、503 ヘイスマンの偏光コントローラ
- 404 偏光スプリッタ
- 410、510、511 誤差信号電子回路
- 504、505 線形アナライザ

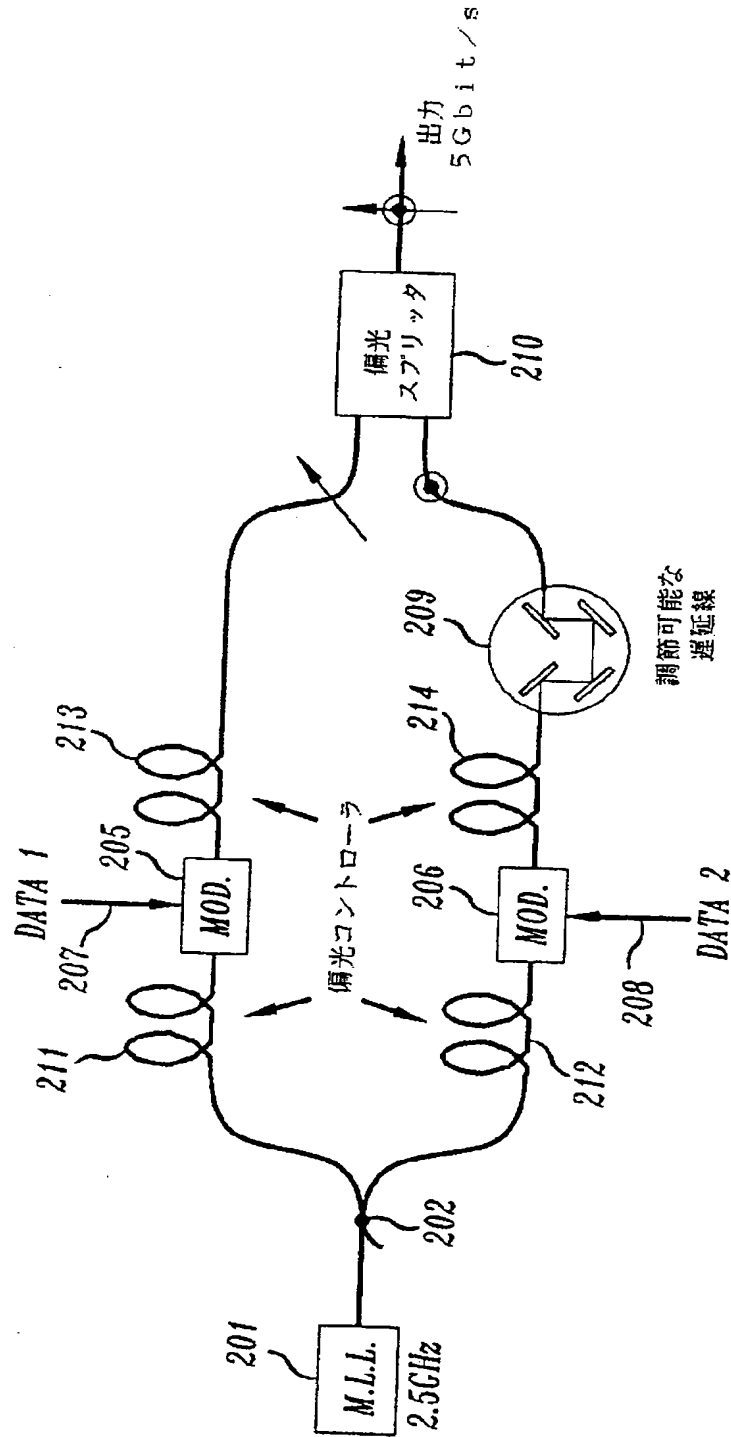
【図1】



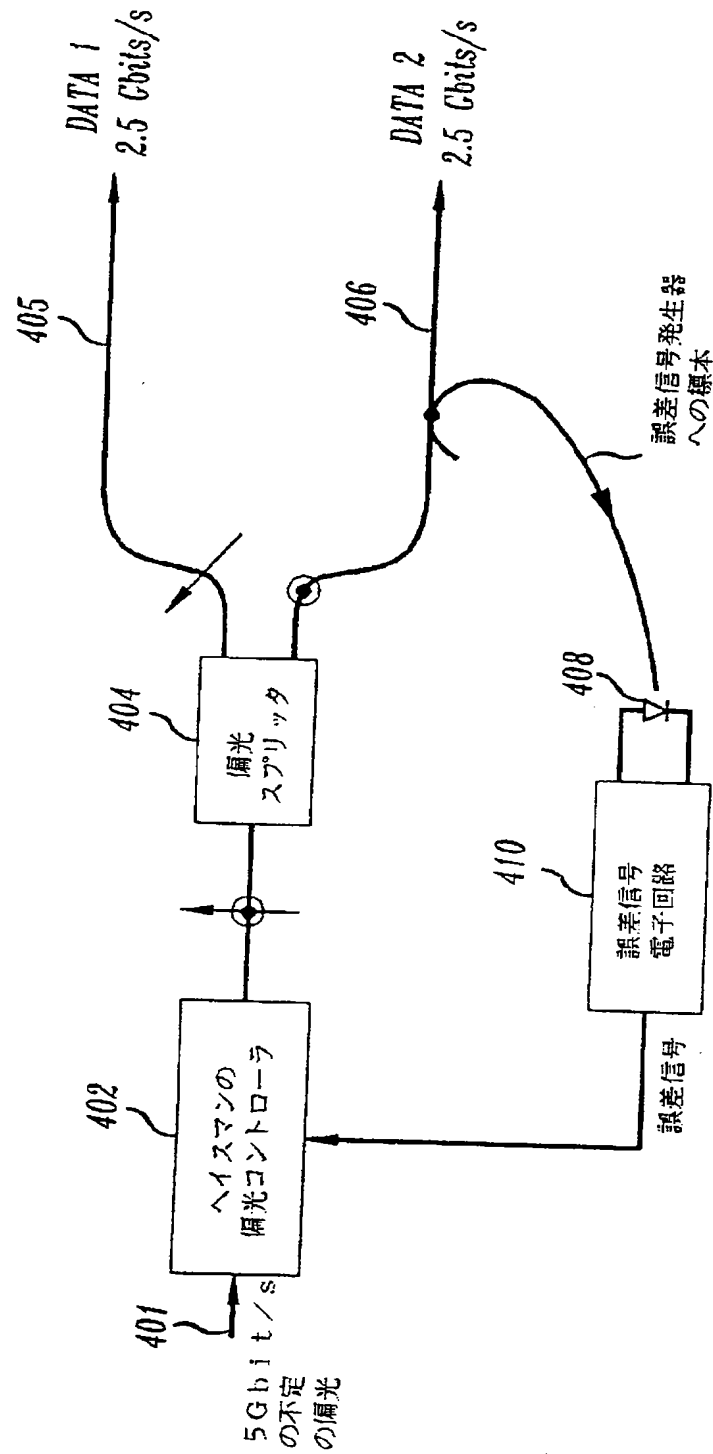
【図3】



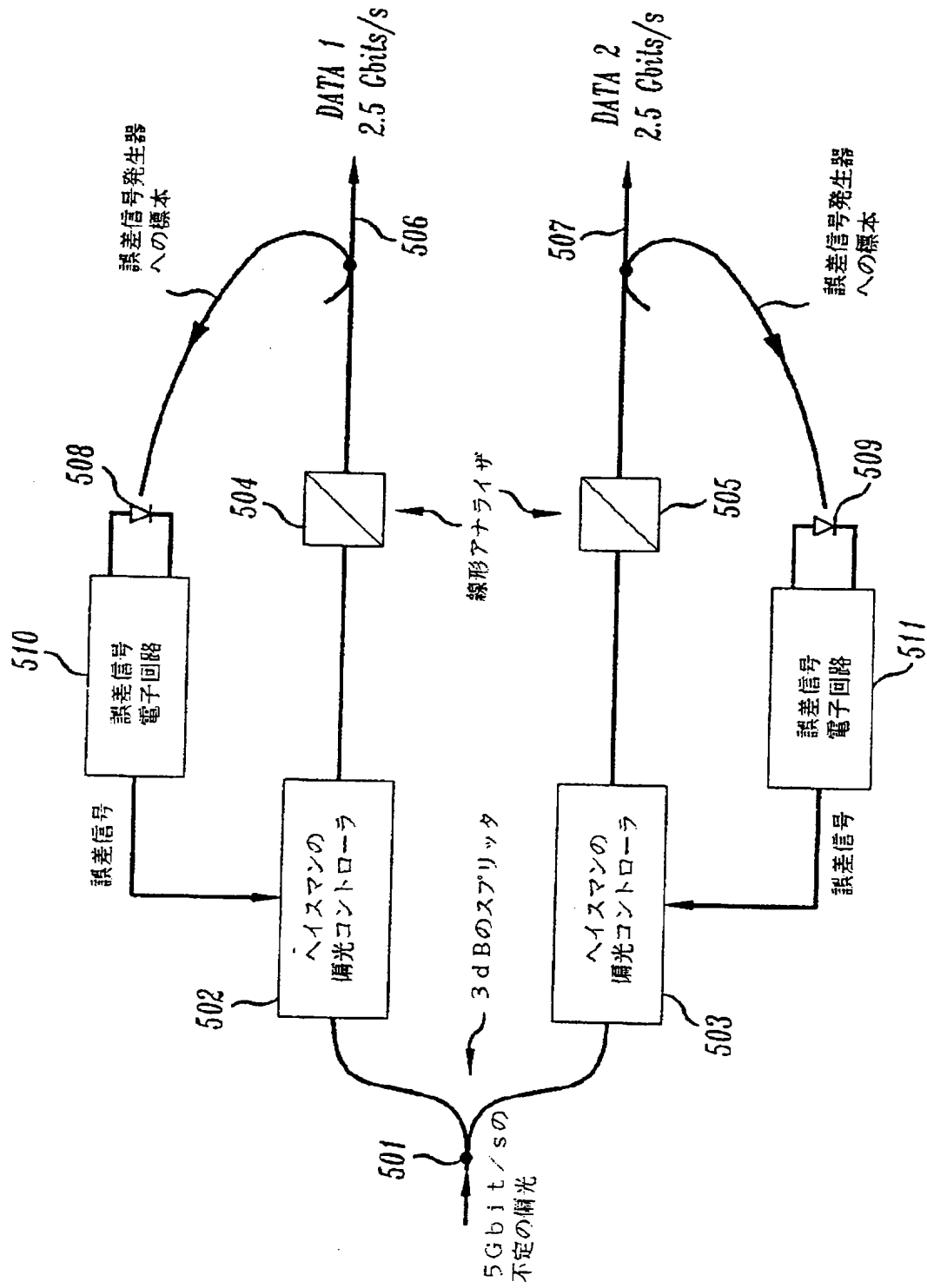
【図 2】



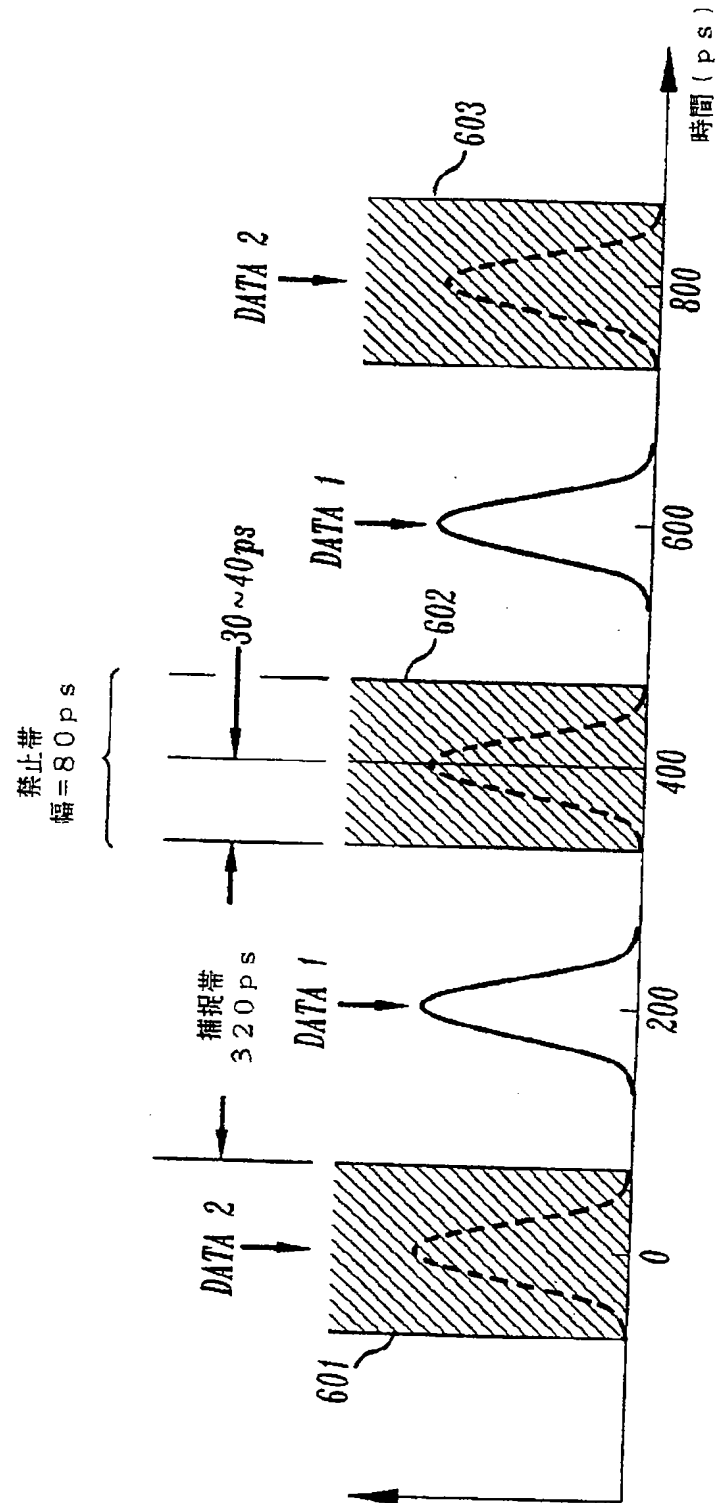
【図 4】



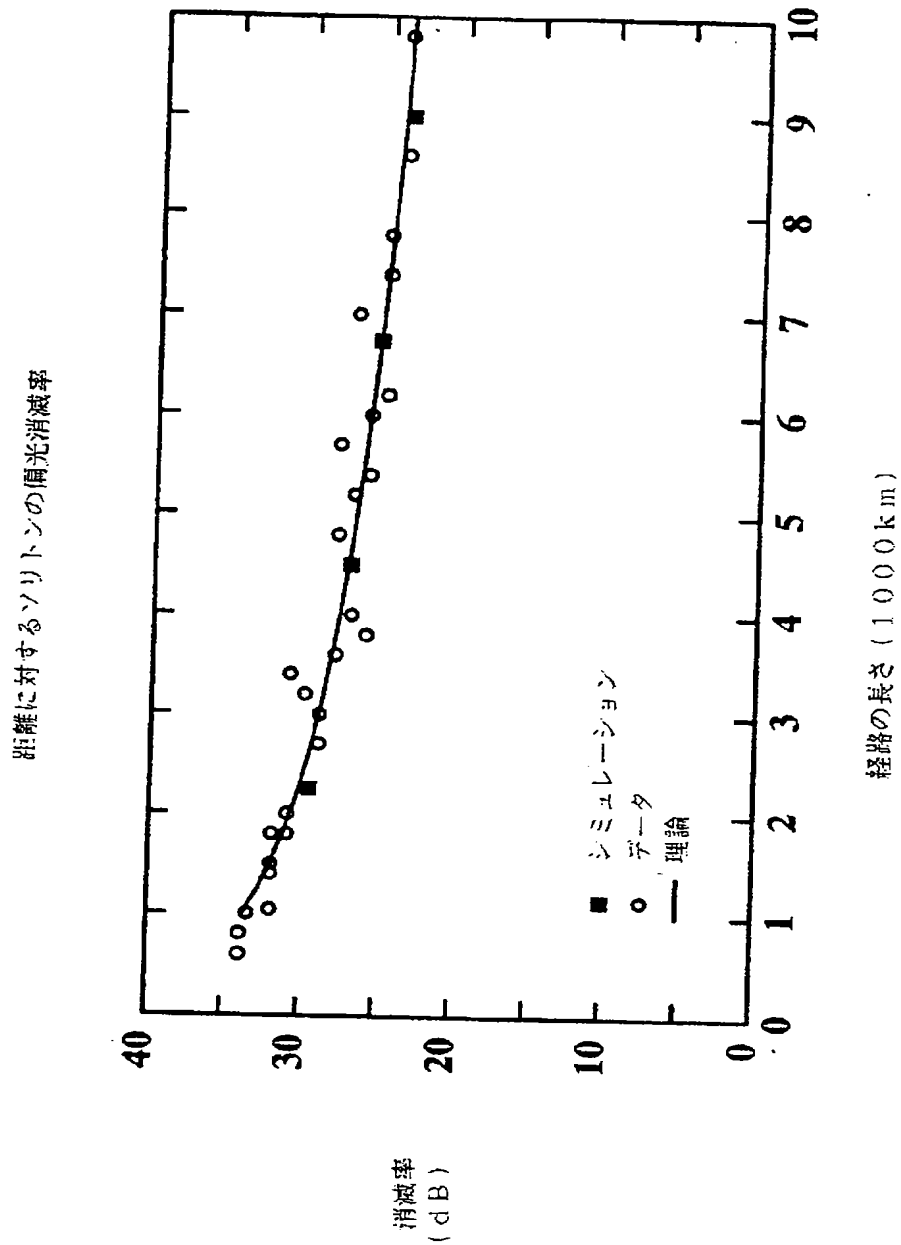
【図 5】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

(72)発明者 ステファン ジー・エヴァンジェリズ
ジュニア
アメリカ合衆国 07748 ニュージャ
ージー ミドルタウン、ノールウッド ド
ライヴ 116

(72)発明者 リン エフ・モルヌール
アメリカ合衆国 07722 ニュージャ
ージー コルツ ネック、キャリッジ ヒ
ル ドライヴ 11

(56)参考文献 特開 平2-264227 (JP, A)
米国特許4932739 (US, A)



US005111322A

United States Patent [19]

Bergano et al.

[11] Patent Number: 5,111,322

[45] Date of Patent: May 5, 1992

[54] POLARIZATION MULTIPLEXING DEVICE
WITH SOLITONS AND METHOD USING
SAME

[75] Inventors: Neal S. Bergano, Lincroft; Stephen G.
Evangelides, Jr., both of
Middletown; Linn F. Mollenauer,
Colts Neck, all of N.J.

[73] Assignee: AT&T Bell Laboratories, Murray
Hill, N.J.

[21] Appl. No.: 680,456

[22] Filed: Apr. 4, 1991

[51] Int. Cl.⁵ G02B 6/28; H04J 11/00

[52] U.S. Cl. 359/122; 359/129;
359/135; 359/184; 359/188; 359/140; 385/1;
385/45; 385/47; 385/36; 385/24

[58] Field of Search 350/96.15, 96.16, 96.29,
350/96.30; 370/1, 2, 3, 4; 455/608, 610, 612;
385/1, 2, 9, 11, 42, 24, 45, 47, 32, 36; 359/122,
123, 124, 127, 129, 135, 173, 182, 195, 246, 184,
156, 188

[56] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,670,165 6/1972 Kinsel 370/2
3,671,747 6/1972 Duguay 370/2

4,507,776 3/1985 Smith 385/2
4,558,921 12/1985 Hasegawa et al. 350/96.29
4,700,339 10/1987 Gordon et al. 370/3
4,881,788 11/1989 Doran 350/96.29
4,932,739 6/1990 Islam 350/96.15
4,941,738 7/1990 Olsson 370/2
4,973,124 11/1990 Kaede 359/127
5,020,050 5/1991 Islam 370/4
5,023,949 6/1991 Auracher et al. 370/2 X
5,035,481 7/1991 Mollenauer 350/96.16
5,063,559 11/1991 Marcuse 359/127

Primary Examiner—Brian Healy
Attorney, Agent, or Firm—B. H. Freedman

[57] ABSTRACT

The single-wavelength bit-rate capacity of an ultra long distance soliton transmission system is increased by using a combination of polarization and time-division multiplexing. More specifically, two streams of differently (preferably orthogonally) polarized solitons are interleaved (time division multiplexed) at a transmitter, and later separated at the receiver to recover both data streams. The system operates at speeds of up to 7.5 GHZ and provides very thorough separation of channels required for 10^{-12} error rates at distances of 9000 km.

22 Claims, 6 Drawing Sheets

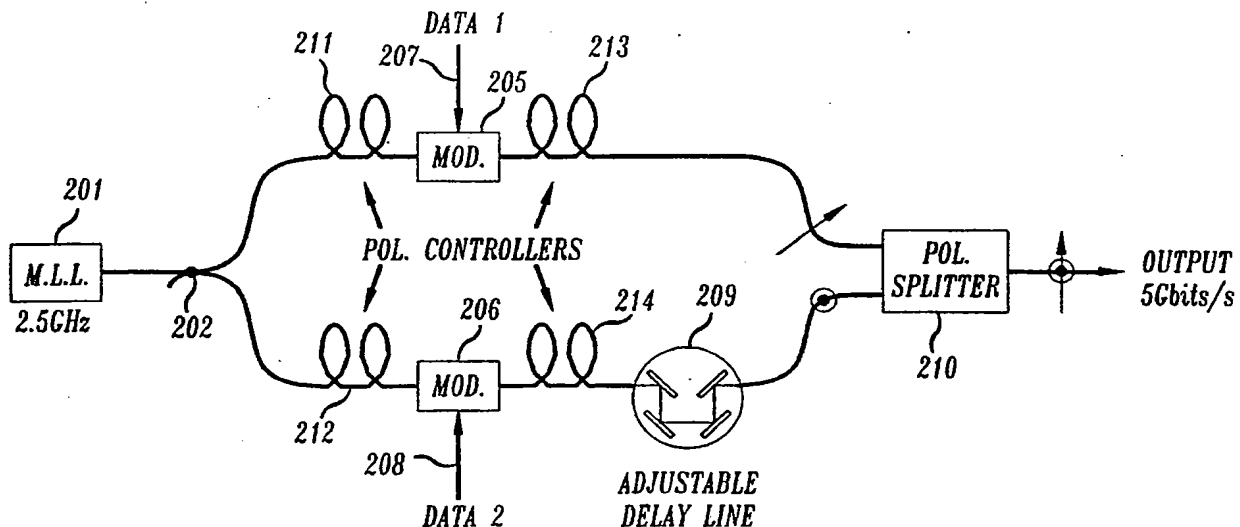


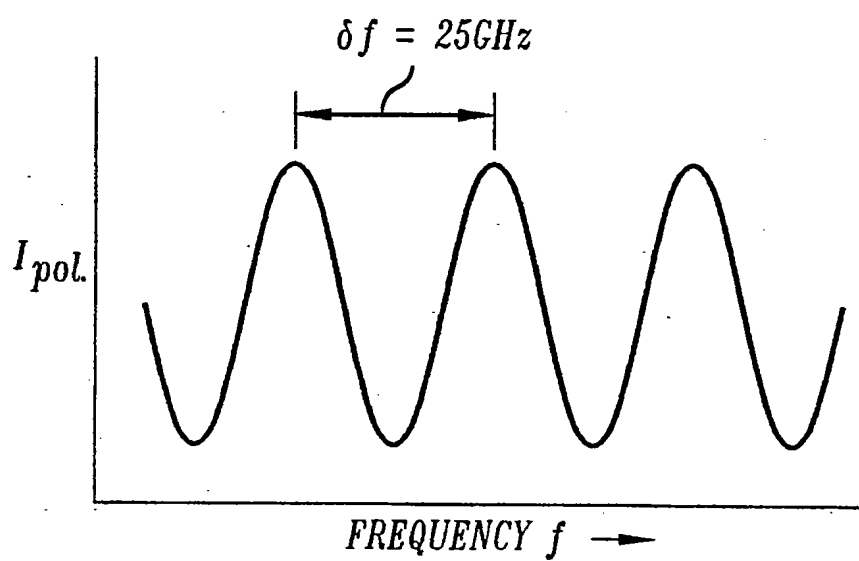
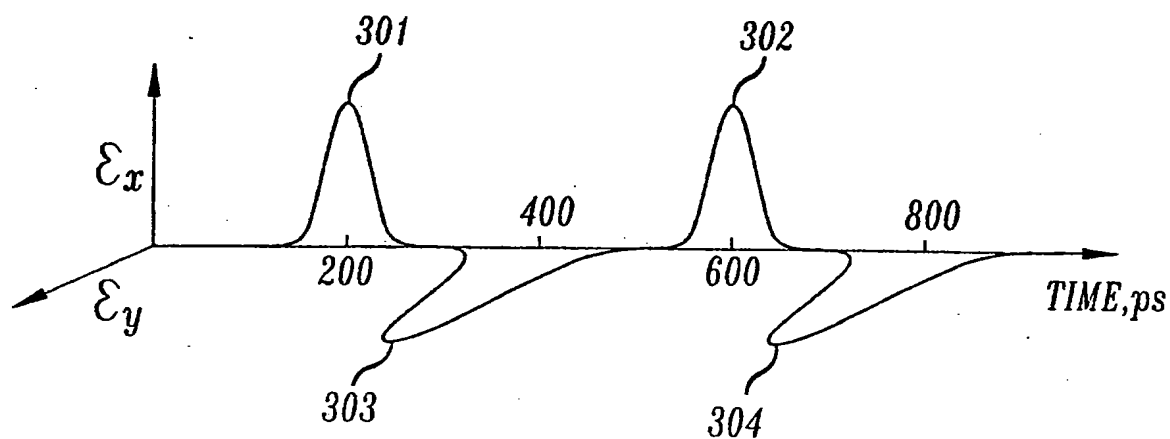
FIG. 1*FIG. 3*

FIG. 2

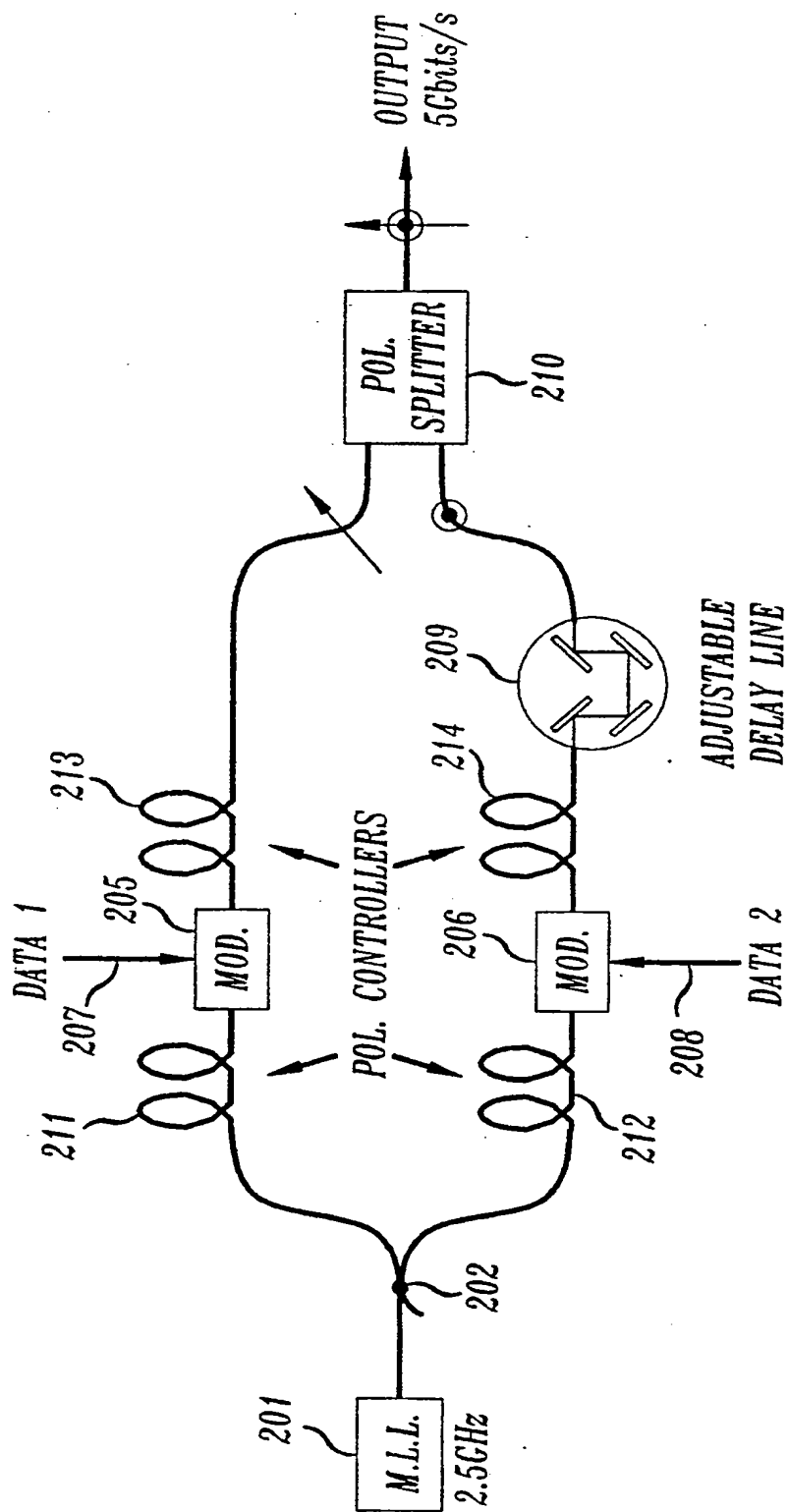


FIG. 4

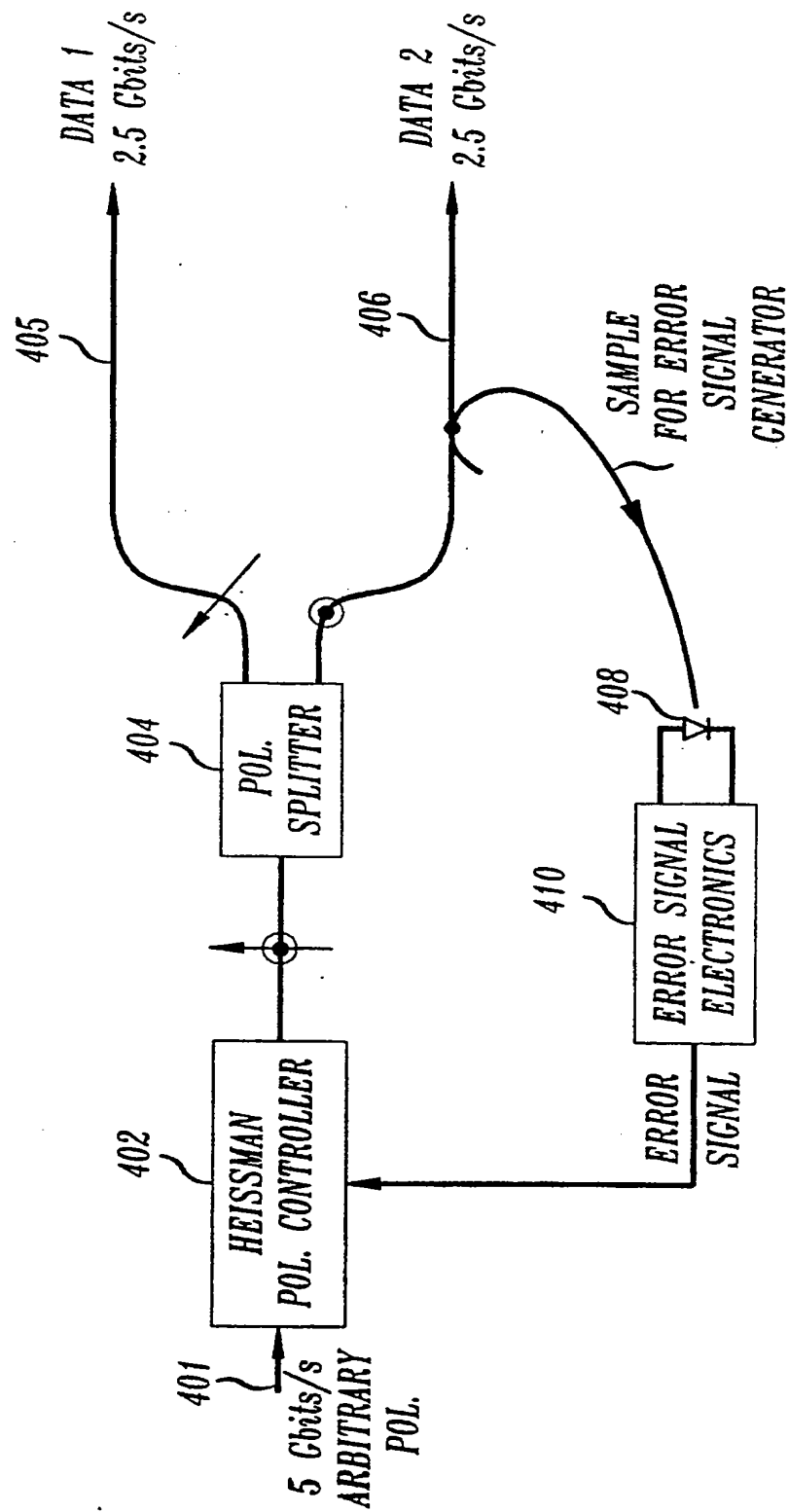


FIG. 5

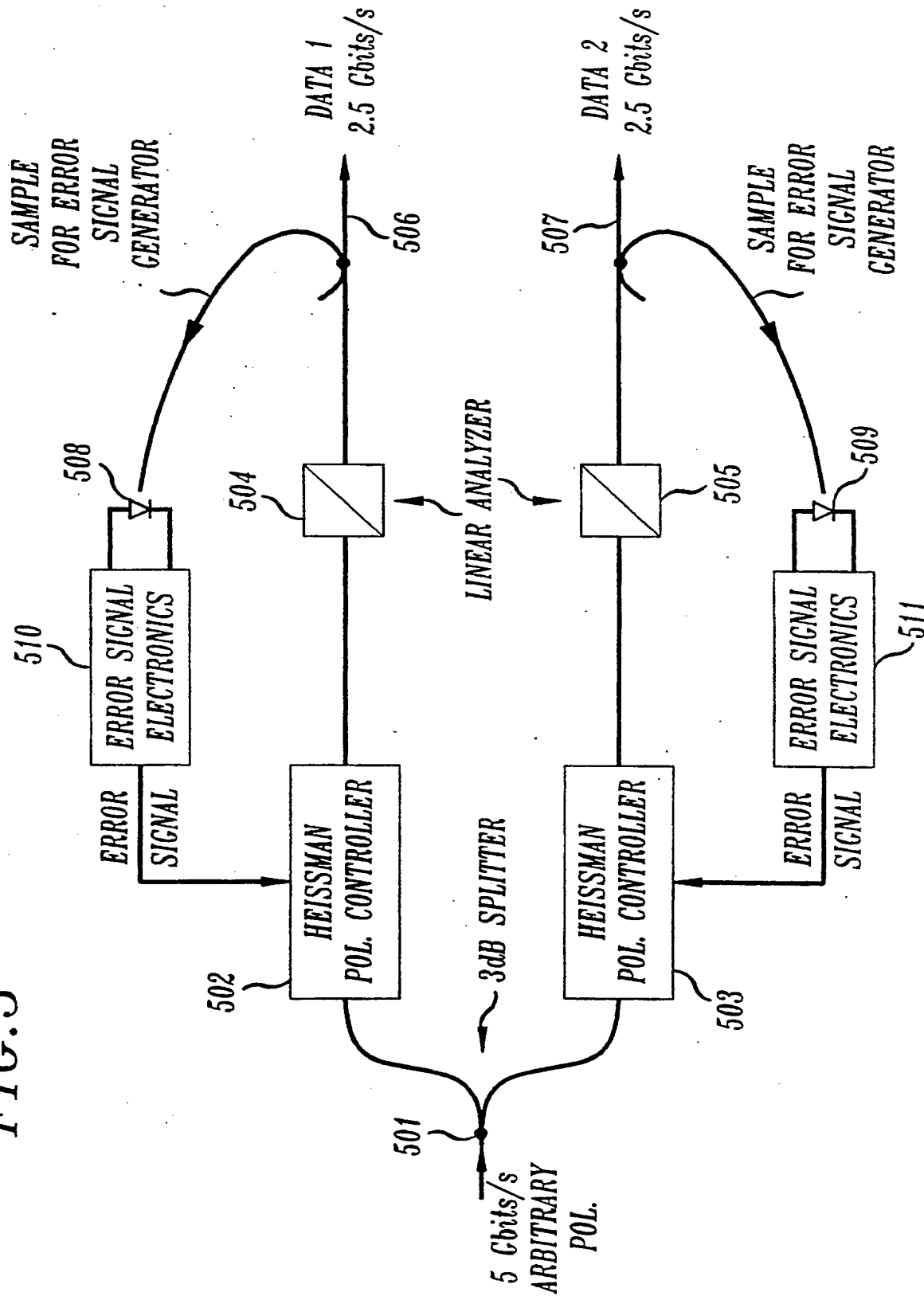


FIG. 6

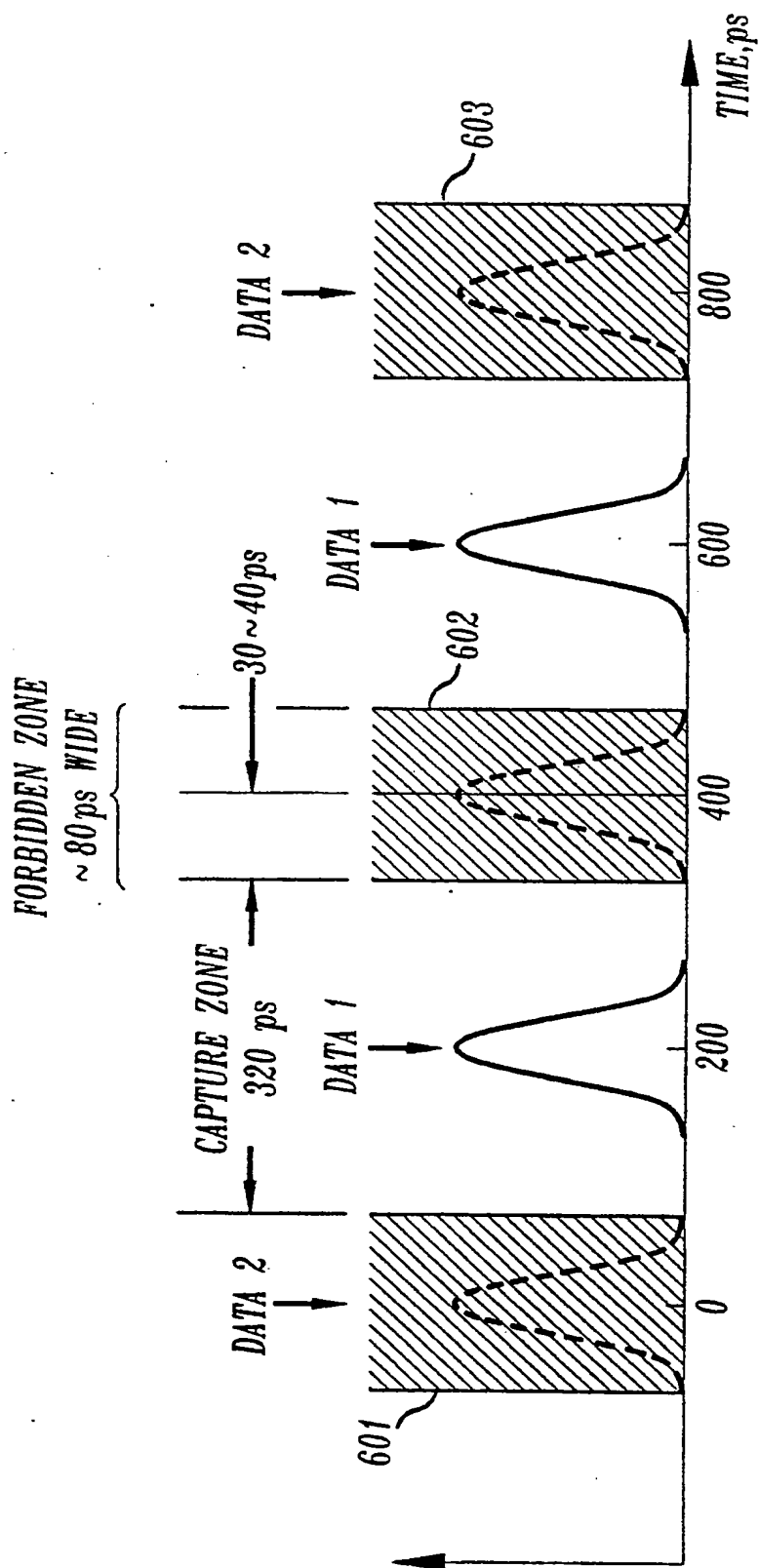
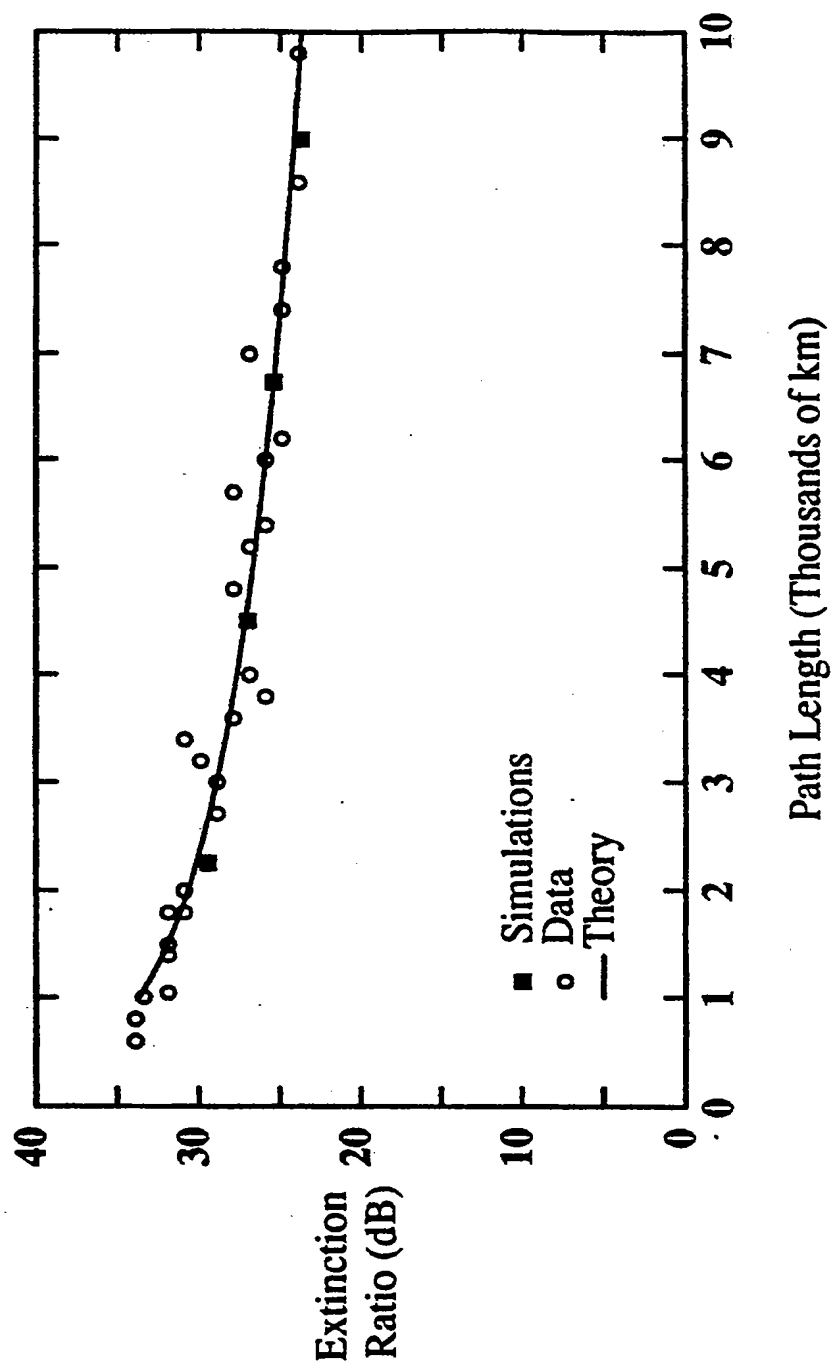


FIG. 7

Soliton Polarization Extinction Ratio vs Distance



POLARIZATION MULTIPLEXING DEVICE WITH SOLITONS AND METHOD USING SAME

FIELD OF THE INVENTION

This invention relates generally to optical fiber communications and in particular to multiplexed communications using solitons.

BACKGROUND OF THE INVENTION

The advantages of using solitons (or, more precisely, shape maintaining pulses of electromagnetic radiation that can exist in single mode optical fiber) in optical fiber communication arrangements, has been discussed in many publications of late. Typical are U.S. Pat. No. 4,406,516 issued on Sept. 27, 1983 to A. Hasegawa, an article by A. Hasegawa et al., *Proceedings of the IEEE*, Volume 69(9), pages 1145-1150 (1981), and an article by applicant that appeared in *Physics World*, September, 1989, page 29 et seq., all of which are incorporated herein by reference.

It is well known that, in order for a pulse to remain a soliton, all its parts are required to maintain a common state of polarization, in spite of a constant evolution in that state of polarization caused by the fiber's birefringence. However, it was not known whether a series of solitons launched with a common polarization and having a common history would, as they traverse a transmission system, emerge with a common state of polarization, on a pulse to pulse basis. A pulse's history can be modified by two things: (1) changes in the birefringence of the fiber segments making up the system, and (2) the spontaneous emission noise (ASE) that is superimposed at random on the individual pulses. The former changes tend to be on a very slow time scale (typically minutes or longer), so that they are easily compensated by an automatic polarization controller device at the output of the system. Thus, only effects of the ASE have the potential to cause pulse-to-pulse changes in the polarization state of the soliton stream.

SUMMARY OF THE INVENTION

In order to implement our invention, we have estimated the effects of the ASE noise from numerical simulations of transmission through a system with random birefringence, and have studied the effects analytically and experimentally. Our simulations show that the polarization of solitons traversing a 9000 km long system (consisting of dispersion shifted fiber with polarization dispersion parameter $\Delta\beta/h^4=0.2$ ps/km⁴ and amplifiers spaced ~30 km apart) is remarkably well preserved.

In accordance with our invention, the capacity of a soliton system is essentially doubled by time multiplexing (i.e., interleaving) two streams of differently (preferably orthogonally) polarized pulses at a transmitter, and by separating the two streams at the receiver to recover both data streams. The system operates at speeds of 5 to 10 Gbits/s and provides very thorough separation of channels required for 10⁻¹² error rates.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

FIG. 1 illustrates the typical variation of intensity I_{pol} of initially polarized non-soliton pulses having a particular state of polarization (SOP), with optical frequency, at the output of a long, randomly birefringent fiber. The typical value of δf is 25 GHz for a 10,000 km long sys-

tem with polarization dispersion parameter ~ 0.2 ps/km⁴;

FIG. 2 illustrates a schematic of a multiplexer arranged in accordance with the present invention;

FIG. 3 illustrates the soliton pulse field envelopes at the output of the multiplexer of FIG. 2;

FIG. 4 is a schematic diagram of the demultiplexer to be used when the incoming signals are orthogonally polarized;

FIG. 5 is a schematic diagram of the demultiplexer to be used when the incoming signals are not perfectly orthogonally polarized, because of a variation in system gain with polarization;

FIG. 6 is a diagram showing forbidden and capture zones for the asymmetrical time-division demultiplexing to be used in conjunction with the polarization division demultiplexing; and

FIG. 7 is a graph illustrating the agreement of computer simulations, analytical models, and experimental results confirming the operation of our invention.

DETAILED DESCRIPTION

The present invention, which utilizes a combination of polarization and time division multiplexing in a soliton communication system, is based on the fact that solitons typically occupy only a small fraction (<20%) of the bit period, so that several streams of pulses carrying information from independent sources can be interleaved in time and multiplexed with different polarizations. At the receiver, polarization separation can be performed on a received signal, as has been confirmed experimentally and theoretically. This is described in more detail below.

Before continuing with the description of our invention, it is important to make clear that the polarization separation possible with solitons is not possible with other pulses. In particular, it is not possible with transmission of more or less square pulses, in a non-return-to-zero (NRZ) format, transmitted at the wavelength of zero chromatic dispersion, (λ_0). In an article by C. D. Poole, "Measurement of Polarization-Mode Dispersion in Single-Mode Fibers With Random Mode Coupling," *Opt. Lett.* 14, pp. 523-525, May, 1989, it has been shown that the transmission system, which looks like a stack of many wave-plates of random strengths and random orientations, can be characterized by the overall time delay difference, $\delta T(\lambda)$, between "fast" and "slow" principal states of polarization. δT has a probability distribution with zero mean $\langle \delta T \rangle = 0$, with standard deviation $\sqrt{\langle \delta T^2 \rangle} = \Delta\beta/h^4 \sqrt{Z}$, where Z is the overall system length. For example, for a system with $\Delta\beta/h^4 = 0.2$ ps/km⁴, and $Z = 10,000$ km, $\sqrt{\langle \delta T^2 \rangle} = 20$ ps.

The above cited article by Poole also reveals that the polarization will have an average period, δf , with changing optical frequency, given by $\delta f = (2\sqrt{\langle \delta T^2 \rangle})^{-1}$. Thus, for $\sqrt{\langle \delta T^2 \rangle} = 20$ ps, one obtains $\delta f = 25$ GHz, and the change in intensity of one output state of polarization (SOP) at the system output as a function of frequency would tend to behave as shown in FIG. 1. Now in an NRZ system, ~10,000 km long, because of the fact that the fiber's nonlinear effect is not canceled out by dispersion (as it is for solitons), the pulses suffer a large net nonlinear phase shift, $\phi_{nl} > \pi$, so that the frequency spectrum of the pulse stream is typically broadened out over many tens of GHz, for systems transmitting at multi-Gbits/s rates. This is described in an article by D. Marcuse, "Single-Channel

Operation in Very Long Nonlinear Fibers with Optical Amplifiers at Zero Dispersion" *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, No. 3, p. 356, March 1991. In view of the rapid variation of polarization with frequency shown in FIG. 1, the various frequency components of the pulse will be polarized in many different ways, so the pulses will be depolarized. Thus, there is no possibility of obtaining the necessary separation of initially orthogonally polarized pulse streams for NRZ, as there is for solitons.

In order to understand the principles of the present invention, and to simplify the description, the multiplexing of 2 channels of 2.5 Gbits/s each, into a single 5 Gbits/s channel, and the corresponding demultiplexing at the receiving end, is first described in conjunction with the multiplexer of FIG. 2.

The signal source for the two channels is a single, mode-locked laser 201, producing ~ 35 –50 ps wide soliton pulses at a 2.5 GHz rate. Its output is split into two soliton pulse streams having essentially orthogonal polarizations, in a splitter 202, and each half separately modulated (with different information bearing signals labeled Data 1 and Data 2) in modulators 205 and 206. Modulator 205 receives a first information bearing signal or data stream on line 207, while modulator 206 receives a second data stream on line 208. The two soliton pulse streams then recombine in a splitter 210, but only after one of the pulse streams is delayed by one-half of the 2.5 Gbit/s bit period in an adjustable delay line 209 so that the two pulse streams are interleaved in time.

A few practical details concerning the apparatus of FIG. 2 are in order here. The modulators 205, 206 should preferably be of the LiNbO₃, balanced Mach-Zehnder type, as those produce virtually no chirping of the soliton pulses, and have an adequate on-off ratio (~ 20 dB). The required linear polarizations at the inputs to modulators 205, 206, and for the polarization multiplexing itself, can either be maintained through the use of (linear) polarization-preserving fiber throughout the multiplexer, or through the use of polarization controllers, such as controllers 211–214, both before and after modulators 205, 206 as shown in FIG. 2. Polarization controllers 211–214 may be arranged as described in an article by H. C. Levevre, "Single-Mode Fiber Fractional Wave Devices and Polarization Controllers", *Electronics Letters*, Vol. 16, p. 778, 1980. For the temporal interleaving of the two soliton pulse streams, it is necessary to make precise adjustment of the relative lengths of the two arms of the multiplexer. This can be done with adjustable delay line 209 which is shown interposed between the output of modulator 206 and polarization splitter 210. Nevertheless, delay line 209 is not absolutely necessary. It is also possible to trim the length of one or the other arm, through one or two trials, to within a few picoseconds of the correct length so the apparatus may remain allwaveguide throughout.

The original soliton pulse stream output from the correctly adjusted multiplexer of FIG. 2 would appear as shown in FIG. 3. The x and y axes represent intensities of pulses of different (orthogonal) polarizations. As an example, soliton pulses 301 and 302 have an initial polarization along the axis and a period of 400 ps. Soliton pulses 303 and 304 have an orthogonal (y direction) polarization, the same period, and are time interleaved with the first series of pulses. Information is carried in the pulse streams by virtue of the presence or absence of pulses at the expected or nominal positions on the time

axis. Note that launching the soliton pulses as in FIG. 3 not only achieves the potential for combined time and polarization division demultiplexing at the receiving end, but also virtually eliminates the potential for cross-phase modulation, and hence virtually eliminates the potential for interaction during transmission, between the two channels.

To verify that the multiplexer is adjusted correctly, a sample of the output pulse stream can be taken, with the two polarization components equally weighted, so that either its optical spectrum, or the microwave spectrum of the detected sample can be observed. In general, the randomly modulated pulse stream will exhibit a line spectrum whose components are separated by multiples of 2.5 GHz. For correct adjustment of the relative arm lengths (perfect temporal interleaving of the soliton pulses), the odd harmonics of 2.5 GHz will disappear, leaving only components spaced by multiples of 5 GHz. Thus, perhaps the simplest device to check on the temporal adjustment could be made from a detector and a simple resonant circuit tuned to 2.5 GHz.

The transmission line itself must meet two requirements for successful polarization division multiplexing-/demultiplexing. First, the overall difference in system gain for any two orthogonal polarizations must be less than a few dB. Second, the δT for the system for any two orthogonal polarizations must be small compared to a bit period. The first requirement can be met by using completely non-polarizing wavelength division multiplexing (WDM) couplers for pump injection (such as those made by JDS Optics, which use essentially normal incidence reflection from interference filters), and by keeping all other potentially polarizing components to a minimum. Such polarization independent gain has been achieved in a recirculating loop which contained nothing but dispersion shifted and amplifier fibers, JDS couplers, a non-polarizing fiber-fusion coupler for input/output, and one nearly non-polarizing isolator. The second requirement is easily met with presently available dispersion shifted fibers, for which the polarization dispersion parameter ($\Delta\beta/h^2$) is now typically ≤ 0.2 ps/nm/km, so that $\sqrt{\langle \delta T^2 \rangle} \sim 20$ ps or less, even for the greatest system length ($\sim 10,000$ km).

To demultiplex the polarized and interleaved soliton pulses at the receiving end, the emerging, and arbitrary, states of polarization must be transformed so that the unwanted channel in each arm of the demultiplexer can be optimally rejected by a linear polarization analyzer. This transformation may be done with the electrically driven and continuously adjustable polarization controller of the kind recently built and tested by F. Heismann et al., as described in *Electronics Letters*, Vol. 27, No. 4, February 1991, p. 377–79. In the case where the overall gains for orthogonal polarizations are substantially equal, the polarizations for the two channels would remain orthogonal throughout. In that event, one polarization controller would be required, and could transform the data streams into two orthogonal linear polarizations. The demultiplexer could then be arranged as shown in FIG. 4.

As shown in FIG. 4, the received multiplexed signal on input 401 is a 5 Gbits/s stream of pulses with arbitrary polarization. This input is applied to a Heismann polarization controller 402, which can transform an arbitrary and varying input state of polarization into any desired specific output state of polarization. This transformation can be used to change the polarization state of the incoming 5 Gbits/s data stream into a state

(e.g., linear polarization) which allows separation into two 2.5 Gbits/s pulse streams on outputs 405 and 406, using only a polarization splitter 404. The pulse stream on output 405 is modulated by one of the information bearing signals, Data 1, while the pulse stream on output 406 is modulated by the other information bearing signal, Data 2. A portion of the signal on output 406 is fed back to controller 402 via a detector 408 and error signal electronics 410, which includes a 2.5 GHz microwave resonant filter that generates an error signal necessary for the controller 402 to track and correct for the slow variations in the polarization state of the incoming 5 Gbits/s pulse stream.

In the more general case, where there will be a small but significant difference in gain for orthogonal polarizations, so that the emerging polarizations of the two channels as contained in the pulse stream applied to the demultiplexer will no longer be perfectly orthogonal. In that case, as shown in FIG. 5, a non-polarizing 3 dB splitter 501 is used to split the input pulse stream and apply a (generally equal) portion to each of two similar Heismann polarization controllers 502 and 503. The output of each controller is applied to a respective linear analyzer 504, 505, which nulls out the unwanted channel in each arm by making its polarization linear and orthogonal to the output from controller 502 or 503. Data 1 is thus recovered on output 506, while data 2 is recovered on output 507.

To generate an error signal for each polarization controller 502, 503, the technique described above in conjunction with FIG. 4 may be used. Thus, a sample of the 2.5 Gbits/s stream from each output 506, 507 of the demultiplexer is applied to a respective detector 508, 509 and passed through a corresponding 2.5 GHz microwave resonant filter 510, 511. Both polarization controllers 502, 503 are adjusted for maximum signal. (For perfectly orthogonal channels, as in FIG. 4, this need be done for only one arm.) To remain locked on to the maximum, as is well-known and has been demonstrated by Heismann in the above-cited reference, it may sometimes be necessary to dither one element of the polarization controller and to use phase sensitive detection to derive the appropriate error signal.

To see why a maximum of the 2.5 GHz signal is needed, note that for the worst possible adjustment of the polarization controller, which would tend to output roughly equal signals from each data stream at each arm of the demultiplexer, the odd multiples of 2.5 GHz would tend to disappear from the microwave spectrum.

Simulations that we have conducted show that the field vectors for the pulses from a given channel, when the mean is converted to a linear polarization, rarely stray by more than about $\pm 3.3^\circ$ from the mean. More precisely stated, the angular deviation has a Gaussian distribution about the mean (0°), whose standard deviation, σ , is about 3° . Thus, for pulses of angular deviation $\leq 7\sigma$ (the probability of pulses deviating $> 7\sigma$ is only about 10^{-10}), a linear analyzer can eliminate all but $(\sin 21^\circ)^2$, or about 15% of the intensity of the most deviant of those pulses of the channel carrying data 2 signals from the channel carrying data 1 signals, and vice versa. Since such leakage is small relative to large excursions of the ASE noise, it is not expected to affect the bit error rate significantly. Note also that it is comparable to the modulator's leakage of energy into the "zeros" at the transmitter. Nevertheless, if necessary, the potential for errors could be further reduced by slightly reducing the time window for detection in each

channel, as shown in FIG. 6. Thus, it is possible to do an asymmetrical time division demultiplexing as well, so that pulses arriving in a narrow time zone about the borders of the normal 2.5 Gbits/s bit period would be suppressed, or stated differently, so that only pulses within a desired time window would be detected and further processed. The suppression just described can be achieved either with another electro-optic modulator, or electronically following detection. For example, if the "forbidden" zone 601, 602, 603 in FIG. 6 extends about $\pm 3\sigma$ on either side of the border, where σ is the standard deviation of the timing jitter described by J. P. Gordon and H. A. Haus, "Random Walk of Coherently Amplified Solitons in Optical Fiber Transmission," *Opt. Lett.* 11, pp. 665-667, October 1986, then the probability that the unwanted pulses would lie outside that zone would be $< 10^{-3}$. Since a typical value for σ , given reasonable assumptions about the amplifier spacings and noise figures, is about 13 ps at 9000 km, about 80 ps in total would be eliminated from the normal 400 ps bit period. On the other hand, for 10^{-12} error rate, the Gordon-Haus jitter requires a total width of about $2 \times 7 \times \sigma$, or about 180-200 ps in this case. Thus, the 320 ps capture zone 604, 605 would allow a large safety margin for the net 5 Gbits/s single-wavelength rate. One could, in fact, have a single-wavelength rate closer to 7.5 Gbits/s (two 3.75 Gbits/s channels multiplexed overall together. This would have adequately large, $267 - 80 = 187$ ps effective capture window). Thus, as asserted earlier, the technique described here should allow one to double, or at least nearly double the single-wavelength capacity of an ultra-long-distance soliton transmission system.

In addition to the simulations described above, we have made direct experimental measurement of the degree of polarization of a train of ~ 50 solitons after they have traversed various distances up to and including 9000 km in a recirculating loop. That is, by converting the emerging polarization into a precisely linear one, we have measured the extinction ratio (intensity ratio of light transmitted through a linear analyzer oriented parallel and perpendicular to the emerging polarization), and we find a value of 24 dB at 9000 km, and correspondingly greater ratios for shorter distances. Furthermore, our experimental measurement is in close agreement with an analytic theory which says that the extinction ratio thus measured should be given by the signal to noise ratio at the given distance. Thus, we have three arguments or pieces of evidence that solitons indeed remain well polarized, viz., the numerical simulations, the experimental measurements, and the analytic theory. The close agreement of all three techniques for verifying the operation of our invention is illustrated in FIG. 7. It can be seen in that figure that the extinction ratio for a path length of about 9000 km is about 24 dB, indicating that less than 1/250 of the energy in the desired polarization direction is lost to the other polarization direction.

Various modifications and adaptations may be made to the present invention by those skilled in the art. For this reason, it is intended that the invention be limited only by the appended claims. Thus, for example, while multiplexing of two signals was shown and described above, it is to be recognized that additional signals can be combined in the same way, provided that successive signals are polarized in appropriately distinct modes.

It should also be kept in mind that the single-wavelength capacity of a soliton system, whatever it is,

could be multiplied at least several times by the use of WDM (wavelength division multiplexing), as described in an article by L. F. Mollenauer, S. G. Evangelides and J. P. Gordon in *Jrnl Lightwave Tech.* Vol. 9, No. 3, March 1991, pp. 362-367, entitled "WDM With Solitons in Ultra Long Distance Transmission Using Lumped Amplifiers."

We claim:

1. Apparatus for multiplexing at least first and second information bearing signals on a fiber optic transmission medium, comprising
 - means for generating a stream of soliton pulses on said transmission medium at a first frequency,
 - means for splitting said stream of soliton pulses into at least first and second pulse streams having essentially orthogonal polarizations;
 - means for modulating said first and second pulse streams with said first and second signals, respectively, to produce first and second modulated signals;
 - means for time interleaving said first and second modulated signals; and
 - means for applying said interleaved signal to said transmission medium.
2. The invention defined in claim 1 further including means at a receiver for separating said interleaved signal into first and second recovered pulse streams having pulses with essentially orthogonal polarizations; and means for recovering said first and second information bearing signals.
3. An optical communication system including means at a transmitter for interleaving first and second information bearing streams of soliton pulses onto an optical transmission medium, said first and second pulse streams having essentially orthogonal polarizations; and means at a receiver for recovering said first and second information bearing signals.
4. A soliton communication system, comprising
 - means for modulating a first stream of soliton pulses with a first signal;
 - means for modulating a second stream of soliton pulses with a second signal;
 - means for interleaving said first and second pulse streams with essentially orthogonal polarizations; and
 - means for applying said interleaved pulse stream to an optical transmission medium.
5. A multiplex transmitter for use in an optical communication system, comprising
 - a source of soliton pulses at a first frequency;
 - means for modulating a first stream of said soliton pulses with a first information bearing signal, the output of said modulating means having a first polarization;
 - means for modulating a second stream of said soliton pulses with a second information bearing signal, the output of said modulating means having a second polarization approximately orthogonal to said first polarization; and
 - means for interleaving said first and second streams of modulated soliton pulses to generate a multiplexed signal at twice said first frequency.
6. The invention defined in claim 5 wherein said interleaving means includes an adjustable delay line adapted to delay said second stream of modulated soliton pulses.
7. A lightwave communication system including

- means for splitting a stream of soliton pulses into a plurality of individual pulse streams having different polarizations;
- means for modulating each of said soliton pulse streams with a different information bearing signal; and
- means for time interleaving each of said modulated pulse streams to generate a multiplexed stream of soliton pulses.
8. An optical multiplexer comprising
 - means for generating first and second streams of soliton pulses having orthogonal polarization;
 - means for modulating said first and second streams with first and second data; and
 - means for interleaving the resulting first and second modulated streams to form a multiplexed signal.
9. The invention defined in claim 8 wherein said generating means includes
 - a source of soliton pulses; and
 - a polarizing pulse splitter.
10. The invention defined in claim 9 wherein said modulating means includes a pulse amplitude modulator.
11. The invention defined in claim 10 wherein said interleaving means includes an adjustable delay line.
12. A method of multiplexing at least first and second information bearing signals on a fiber optic transmission medium, comprising the steps of
 - generating a stream of soliton pulses on said transmission medium at a first frequency,
 - splitting said stream of soliton pulses into at least first and second pulse streams having essentially orthogonal polarizations;
 - modulating said first and second pulse streams with said first and second signals, respectively, to produce first and second modulated signals;
 - time interleaving said first and second modulated signals; and
 - applying said interleaved signal to said transmission medium.
13. The method defined in claim 12 further including the step of separating, at a receiver, said interleaved signal into first and second recovered pulse streams having pulses with essentially orthogonal polarizations; and recovering said first and second information bearing signals.
14. An optical communication method including the steps of
 - interleaving first and second information bearing streams of soliton pulses onto an optical transmission medium, said first and second pulse streams having essentially orthogonal polarizations; and
 - recovering said first and second information bearing signals at a remote receiver.
15. A soliton communication method, comprising the steps of
 - modulating a first stream of soliton pulses with a first signal;
 - modulating a second stream of soliton pulses with a second signal;
 - interleaving said first and second pulse streams with essentially orthogonal polarizations; and
 - applying said interleaved pulse stream to an optical transmission medium.
16. A method of multiplex transmission in an optical communication system, comprising the steps of forming first and second streams of soliton pulses;

9

modulating said first stream of said soliton pulses with a first information bearing signal, the output of said modulating step having a first polarization;
modulating said second stream of said soliton pulses with a second information bearing signal, the output of said modulating step having a second polarization approximately orthogonal to said first polarization; and
interleaving said first and second streams of modulated soliton pulses to generate a multiplexed signal.

17. The method defined in claim 16 wherein said interleaving step includes delaying said second stream of modulated soliton pulses using an adjustable delay.

18. A lightwave communication method including the steps of
splitting a stream of soliton pulses into a plurality of individual pulse streams having different polarizations;

10

modulating each of said soliton pulse streams with a different information bearing signal; and
time interleaving each of said modulated pulse streams to generate a multiplexed stream of soliton pulses.

19. A method of optical multiplexing comprising the steps of
generating first and second streams of soliton pulses having orthogonal polarization;
modulating said first and second streams with first and second data; and
interleaving the resulting first and second modulated streams to form a multiplexed signal.

20. The method defined in claim 19 wherein said generating step includes splitting the output from a single source of soliton pulses.

21. The invention defined in claim 19 wherein said modulating step includes pulse amplitude modulation.

22. The invention defined in claim 21 wherein said interleaving step includes adjusting the delay introduced in one of said pulse streams.

* * * * *

25

30

35

40

45

50

55

60

65